

## ХИМИЯ

УДК 544.726

*Ю. О. Антуганова, М. А. Синякова***КИНЕТИКА ОБМЕНА ИОНОВ МЕТАЛЛОВ  
НА ИОНИТЕ «ПОЛИСУРЬМИН»  
И КОМПОЗИЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ НА ЕГО ОСНОВЕ\***

Санкт-Петербургский государственный университет,  
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

Исследована кинетика обмена ионов меди, кобальта, кальция, калия и цезия на неорганическом кремнесурьмяном ионите «полисурьмин», представляющем собой смешанный оксигидрат сурьмы и кремния, и композиционном материале, состоящем из ионита «полисурьмин» и органического полимера. Установлено, что степени обмена, близкие к 1, достигаются за 2 сут и менее, причём на полисурьмине обмен протекает быстрее. Показано, что кинетические зависимости для исследованных ионов в общем сходны, но имеют индивидуальные особенности. Величина достигаемой ёмкости и её зависимость от времени определяются составом и структурой ионита и свойствами поглощаемого иона. Проведена обработка полученных результатов для оценки, насколько это возможно в заданных условиях, лимитирующей стадии процесса. Сформированы ряды селективности для объектов исследования. Библиогр. 18 назв. Ил. 6. Табл. 4.

*Ключевые слова:* ионный обмен, неорганические иониты.

*Yu. O. Antuganova, M. A. Siniakova***KINETICS OF ION METALS EXCHANGE  
ON THE ION-EXCHANGER “POLYSURMIN”  
AND ON COMPOSITE MATERIALS BASED ON IT**

St. Petersburg State University, 7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

The kinetics of ion exchange of copper, cobalt, calcium, potassium and cesium on an inorganic ion exchanger “polysurmin” from antimony and silicon and the composite material from “polysurmin” and an organic polymer has been investigated. It was found that the degree of exchange of close to 1, achieved during 2 days or less, with at polysurmine exchange is faster. It was shown that the kinetic dependences of the investigated ions are generally similar, but have individual features. Value reaches capacity and its time dependence depend on the composition and structure of the resin and the properties of the absorbing ion. Results have been evaluated, so far as is possible under the given conditions, in order to define the limiting stage of the process. Selectivity rows have been formed. Refs 18. Figs 6. Tables 4.

*Keywords:* ion exchange, inorganic ion-exchangers.

\* Работа выполнена при поддержке гранта СПбГУ 12.0.16.2010.

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2016

**Введение.** Ионный обмен играет важную роль в ряде природных и технологических процессов, агрохимии, медицине, водоподготовке и очистке сточных вод [1–6]. На основе ионитов различных типов создаются материалы нового поколения, в том числе мембранные [1]. Способность разделять два раствора ионообменные мембраны сочетают с присущими иониту химическими и электрохимическими свойствами. Важнейшими являются различная проницаемость мембран для ионов с различными знаками заряда и нейтральных молекул, а также высокая электропроводность, которая позволяет использовать мембраны в электрохимических процессах и аппаратах. Для создания композиционных материалов используют полимеры различных типов, в том числе фторполимеры. Перфторполимерные мембраны выдерживают действие концентрированных растворов щелочей, кислот, окислителей, газообразного хлора и других агрессивных сред, обладают высокой электропроводностью, механической прочностью, с их помощью можно решать широкомасштабные задачи водоподготовки, переработки стоков промышленных производств с извлечением ценных компонентов [7–9], разделения газовых смесей. Комплекс свойств модифицированного полимера определяется свойствами ионита и исходного полимера, а также дисперсностью и формой частиц наполнителя.

Эффективное использование в технологии любых ионитов затруднено (а порой невозможно) без знания их кинетических свойств. В настоящее время кинетика ионного обмена для неорганических ионитов изучена значительно хуже, чем для органических. Отсутствие систематических сведений по этим вопросам становится серьёзным препятствием при применении уже существующих ионитов и при разработке новых [3].

**Экспериментальная часть.** Объектами исследований являлись неорганический ионит полисурьмин и композиционный материал на его основе. Полисурьмин — смешанный оксигидрат сурьмы и кремния, структура которого аналогична кристаллической сурьмяной кислоте. Предполагается, что каркас вещества построен из октаэдров  $[\text{SbO}_6/2]^-$  и  $[\text{SiO}_6/2]^{2-}$ ; такая форма записи показывает, что в каждой ячейке (в центре) один атом сурьмы или кремния связан с шестью атомами кислорода, а один атом кислорода (находящийся в углах октаэдра) — с двумя атомами сурьмы или кремния [5, 10]. Отрицательный заряд каркаса должен быть скомпенсирован положительным зарядом противоионов. Полисурьмин является лекарственным препаратом и применяется при интоксикации изотопами стронция и другими двухзарядными ионами.

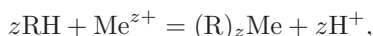
Этот ионит имеет вид белых частиц неправильной формы, удобных при пероральном применении, но не слишком пригодных для изготовления мембран, нитей, трубок или нанесения на поверхность инертного материала. Очевидный недостаток может быть преодолен за счёт создания композиционного материала на основе полисурьмина и органического полимерного связующего, например фторопласта Ф-26. Композит обладает большей, чем исходный ионит, пластичностью, но ионообменная ёмкость понижается, поэтому важной задачей является подбор оптимального соотношения ионита и связующего. В работе применялся композиционный материал, содержащий 60% полисурьмина и 40% фторопласта; это отношение было признано оптимальным по результатам предыдущих исследований [11, 12]. Для получения композита полисурьмин измельчали, просеивали, частицы размером менее 100 мкм вводили в раствор фторопласта в ацетоне; после испарения ацетона полученная система формировала плёнку (мембрану), нарезаемую затем на отдельные фрагменты  $0,5 \times 0,5$  см.

Для обоих объектов определяли величины удельной поверхности методом адсорбции азота, влажность, насыпную и истинную плотность — пикнометрическим методом, для полисурьмина (в Ресурсном центре СПбГУ «Инновационные технологии композитных

наноматериалов») — распределение частиц по размерам методом лазерной дифракции, а также были получены электронные фотографии частиц обоих ионообменников.

Для определения обменной ёмкости использовали аналитические весы ВЛР-200, обеспечивавшие точность  $\pm 0,0005$  г, навески полисурьмина массой по 0,5 г и навески композиционного материала массой по 0,83 г. В последнем случае количество собственнo ионообменника также составляло 0,5 г. Именно по отношению к массе ионита рассчитывалась величина обменной ёмкости для композита. Навески контактировали с водными растворами  $\text{CuCl}_2$ ,  $\text{CoCl}_2$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{CsCl}$  и  $\text{KCl}$ . Объём раствора во всех случаях составлял  $50 \text{ см}^3$ , концентрация  $\approx 0,1 \text{ мэкв-см}^{-3}$ . Растворы приготавливались из солей квалификации х. ч. По истечении определённого времени производилось отделение ионита от раствора. Концентрация ионов меди, кальция и кобальта определялась трилонометрическим методом [13], цезия и калия — параллельно рентгенофлуоресцентным методом (в Ресурсном центре СПбГУ «МАСВ») и титриметрическими методами. Для определения pH использовался милливольтметр pH-673 (стеклянный электрод ЭСЛ-63-07, хлорсеребряный электрод ЭВЛ-1М3). Контрольные интервалы времени составляли 0,5, 1, 3 ч, 1, 2, 7 и 14 сут.

При контакте происходил обмен ионов:



где R — ионообменник;  $\text{Me}^{z+}$  — ион металла;  $z$  — заряд иона.

Обменная ёмкость  $\Gamma$ ,  $\text{мэкв-г}^{-1}$ , рассчитывалась по уравнению

$$\Gamma = \frac{(C^{\text{исх.}} - C^*)V}{g},$$

где  $C^{\text{исх.}}$  и  $C^*$  — исходная и равновесная концентрации  $\text{Me}^{z+}$  в растворе соответственно,  $\text{мэкв-см}^{-3}$ ;  $V$  — объём раствора,  $\text{см}^3$ ;  $g$  — исходная масса навески, г.

Строились зависимости  $\Gamma$  от времени контакта ионообменника и раствора, по которым определяли  $\Gamma_{\text{макс.}}$ .

Расчёт величин степеней обмена  $F$  производился по уравнению

$$F = \frac{\Gamma}{\Gamma_{\text{макс.}}}$$

Для оценки лимитирующей стадии процесса рассчитывали величины  $\ln(1 - F)$  и  $B\tau$ .

Согласно существующим представлениям, в тех случаях, когда лимитирующей стадией процесса обмена является диффузия в плёнке жидкой фазы, окружающей частицу ионита (плёночная кинетика), зависимость величины  $\ln(1 - F)$  от времени контакта ионита и раствора должна иметь линейный характер. Для случая, когда лимитирующей стадией является диффузия ионов в частице ионита (гелевая кинетика), при малых степенях обмена характерна линейная зависимость между  $F$  и  $\tau^{1/2}$ , а при значительных — линейная зависимость  $B\tau$  от  $\tau$  [3, 14, 15].

**Результаты и их обсуждение.** Полисурьмин отличается достаточно высокой плотностью и развитой удельной поверхностью (табл. 1). По сравнению с ним композит несколько менее плотный, а удельная поверхность у него заметно меньше. Насыпная плотность композиционного материала может варьироваться в зависимости от величины отдельных частиц плёнки. Распределение частиц полисурьмина по размерам после ультразвуковой обработки практически не меняется, что указывает на отсутствие агрегации.

Характеристика ионообменника

Характеристика	Полисурьмин	Композит
Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	1,10	0,24
Истинная плотность, г/см <sup>3</sup>	2,77	2,18
Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г	172	22
Влажность, %	6,45	4,75
Размеры частиц (DV50 US), мкм	841	—
Размеры частиц (DV50), мкм	882	—

На электронных фотографиях (рис. 1) видна своеобразная зернистая структура полисурьмина, его полости и так называемый «краевой эффект» — осветление, вызванное интенсивным испусканием электронов с заостренных участков поверхности.

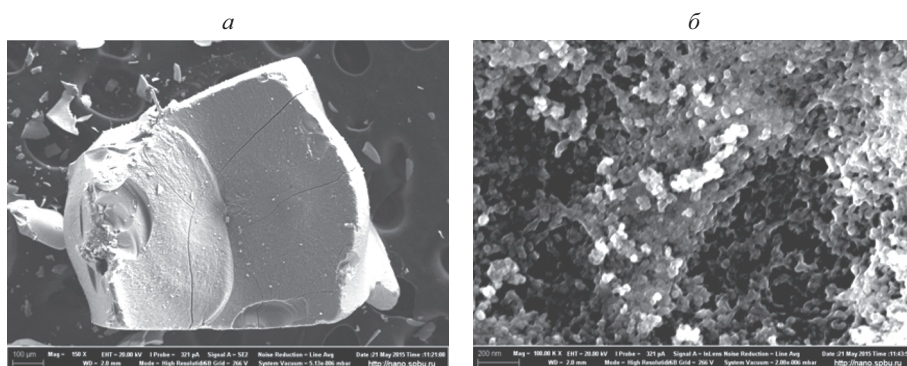


Рис. 1. Частицы полисурьмина под электронным микроскопом при увеличении в 150 (а) и 100 000 (б) раз

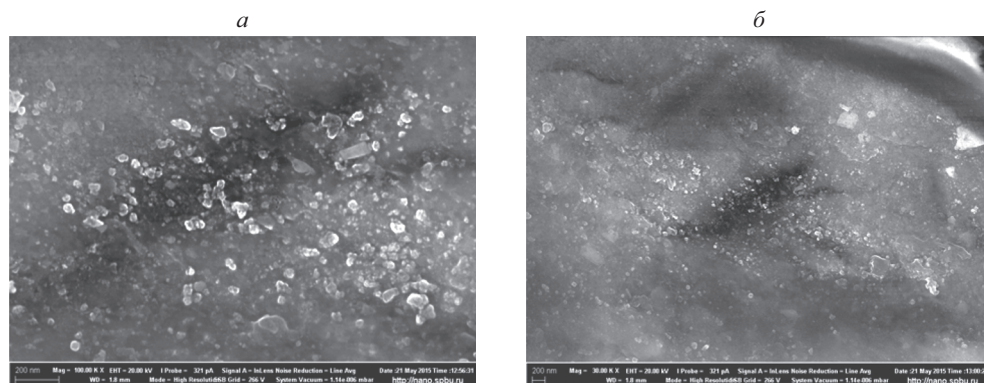
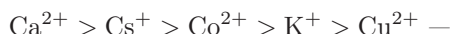


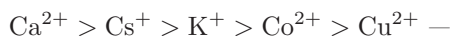
Рис. 2. Композиционный материал под электронным микроскопом при увеличении в 100 000 (а) и 30 000 (б) раз

На электронных фотографиях композита (рис. 2) превосходно просматриваются небольшие ( $< 0,1$  мм) частицы полисурьмина, достаточно равномерно распределённые по объёму фазы (по замечанию сотрудника РЦ «Нанотехнология», полученная структура напоминает холодец).

Зависимости обменной ёмкости от времени для всех изученных случаев сходны в общем, но имеют индивидуальные особенности (рис. 3 и 4). Некоторые из них отличаются «скачком» в начальном периоде контакта (менее 1 сут), но в большинстве случаев  $\Gamma$  плавно возрастает и достаточно быстро стабилизируется. Спустя 2 сут или менее достигается состояние, близкое к равновесному. Величины  $\Gamma_{\text{макс.}}$ , реализуемые при обмене различных  $\text{Me}^{2+}$ , достаточно резко отличаются: наиболее эффективно оба ионообменника поглощают ионы кальция, затем следуют ионы цезия, затем — кобальта, меди и калия. На основании полученных результатов можно предложить следующие ряды селективности:



для полисурьмина;



для композита.

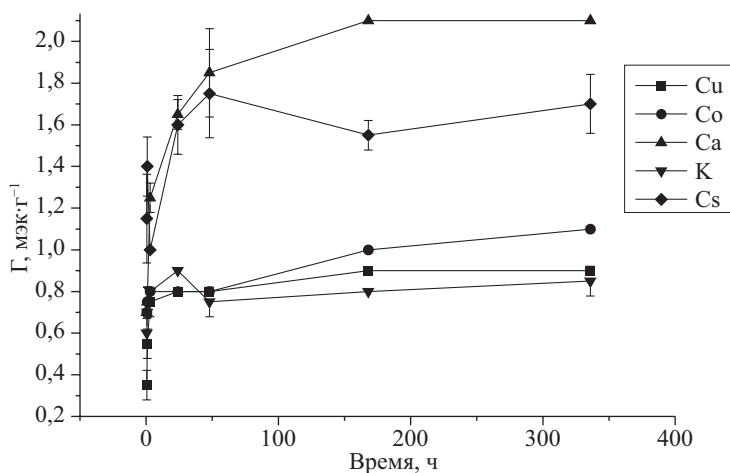


Рис. 3. Зависимости величин обменной ёмкости полисурьмина от времени взаимодействия

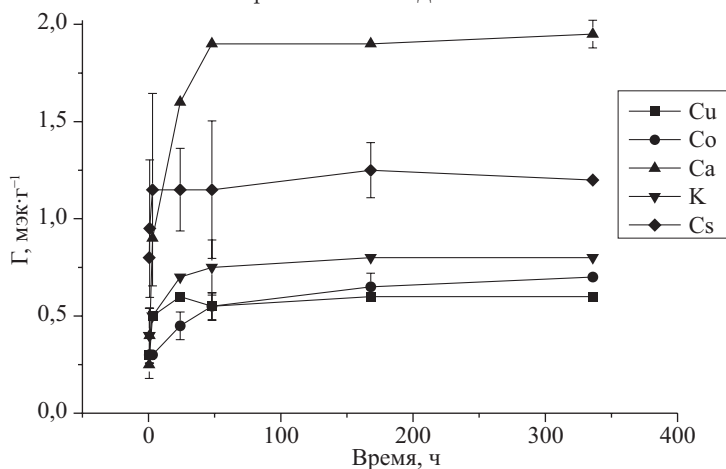


Рис. 4. Зависимости величин обменной ёмкости композиционного материала от времени взаимодействия

При обмене разнозарядных ионов иониты обычно эффективнее поглощают ионы большего заряда, а в ряду ионов одного заряда большим «успехом» пользуются ионы, имеющие меньший сольватированный радиус. Однако в рядах селективности для ионитов различных типов часто наблюдаются отклонения от этих правил [3, 14, 16], связанные со структурными особенностями ионитов, частичной или полной десольватацией ионов или другими факторами. В нашем случае однозначной связи между размерами ионов и предпочтительностью их поглощения не просматривается (табл. 2).

Таблица 2

Радиусы ионов  $Me^{z+}$

Радиус	Cu	Co	Ca	K	Cs
Ионный	0,8	0,78	1,04	1,33	1,65
Стоксовский	3,34	3,76	3,08	1,25	1,19

По отношению к любому из исследованных ионов композиционный материал (точнее, его ионообменная составляющая) проявляет меньшую ёмкость, чем полисурьмин. Это соответствует результатам, полученным ранее [17]. Органическое связующее — фторопласт — не будучи ионообменником, влияет на перемещение ионов в пределах фазы. Известно, что при содержании в композиционном материале связующего 60% и более наблюдается т. н. «эффект капсулирования»: фторопласт, слишком плотно окружая ионит, препятствует доступу обмениваемых ионов к обменным центрам. При уменьшении содержания органического связующего его влияние уменьшается, но не исчезает.

Сопоставление безразмерных величин  $F$  позволяет успешнее сравнивать скорости обмена ионов  $Me^{z+}$ . На рис. 5 и 6 видно, что как бы ни различались между собой значения  $\Gamma_{\text{макс.}}$  для исследованных ионов, достигаются они практически с идентичными скоростями. Для полисурьмина эти скорости несколько больше, чем для композита.

На основании полученных экспериментальных результатов были определены зависимости  $\ln(1 - F)$  и  $B\tau$  от  $\tau$  и рассчитаны коэффициенты корреляции (табл. 3 и 4) по методу наименьших квадратов.

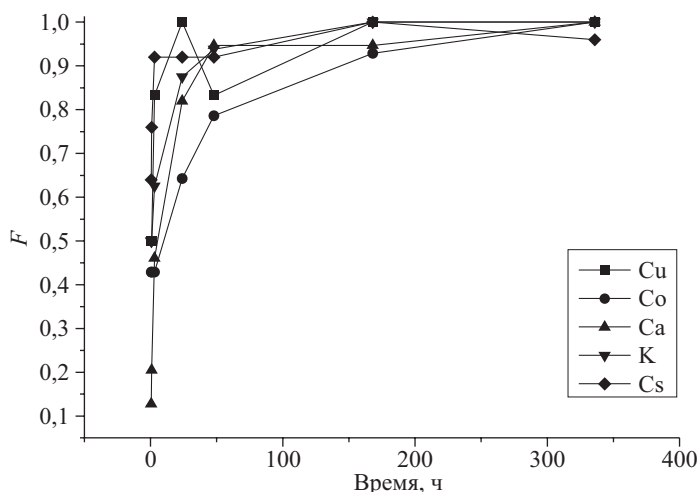


Рис. 5. Зависимости степеней обмена полисурьмина от времени взаимодействия

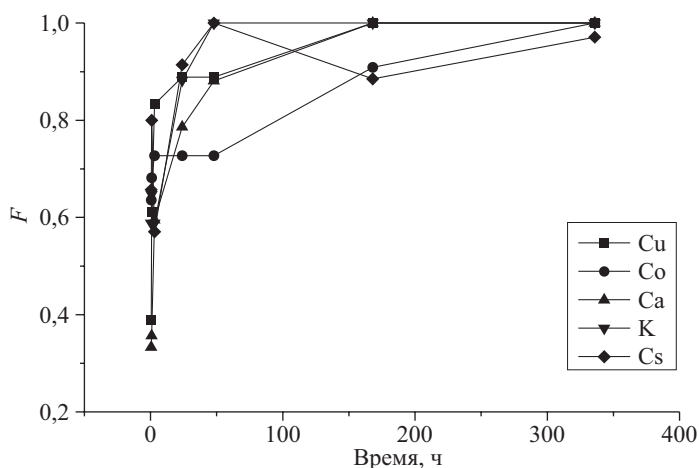


Рис. 6. Зависимости степеней обмена композиционного материала от времени взаимодействия

Таблица 3

Коэффициенты корреляции  
для обмена  
на полисурьмине

Ион	$\ln(1 - F)$ от $\tau$	$B\tau$ от $\tau$
$\text{Cu}^{2+}$	0,56	0,45
$\text{Co}^{2+}$	0,94	0,95
$\text{Ca}^{2+}$	0,93	0,96
$\text{K}^+$	0,72	0,71
$\text{Cs}^+$	0,84	0,28

Таблица 4

Коэффициенты корреляции  
для обмена  
на композиционном материале

Ион	$\ln(1 - F)$ от $\tau$	$B\tau$ от $\tau$
$\text{Cu}^{2+}$	0,96	0,72
$\text{Co}^{2+}$	0,95	0,97
$\text{Ca}^{2+}$	0,61	0,63
$\text{K}^+$	0,45	0,45
$\text{Cs}^+$	0,97	0,97

Полученные результаты не позволяют однозначно выявить лимитирующие стадии обмена для изучаемых ионитов, но представляют первый важный шаг в решении этой задачи. Следует иметь в виду, что нахождение скорости определяющей стадии — вообще очень сложный вопрос, особенно для немонодисперсных ионитов (к которым относятся объекты исследования), и для её оценки рекомендуется использовать не один, а несколько методов [14, 18].

#### Выводы.

1. Изучена кинетика поглощения ионов  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  и  $\text{Cs}^+$  на неорганическом ионите «полисурьмин» и композиционном материале на основе полисурьмина и органического полимерного связующего. В каждом конкретном случае вид кинетических зависимостей имеет свои индивидуальные особенности, но в то же время для них всех характерны некоторые общие закономерности.
2. Установлено, что на величину достигаемой ёмкости и её зависимость от времени влияют такие факторы, как состав и структура ионита и свойства поглощаемого иона.
3. На всех исследованных ионитах поглощение ионов протекает достаточно быстро, достигая степеней обмена, близких к единице, за период контакта 2 сут и менее.
4. Обмен ионов на полисурьмине протекает в целом быстрее, чем на композиционном материале, и для одних и тех же ионов ёмкости для полисурьмина больше, чем для композиционного материала.



5. При сравнении величин обменной ёмкости для исследованных ионообменников были получены соответствующие ряды селективности.

\* \* \*

Авторы выражают благодарность Д. А. Александрову; РЦ СПбГУ «Методы анализа состава вещества» и лично А. А. Гойденко; РЦ СПбГУ «Инновационные технологии композитных наноматериалов» и лично П. Колоницкому; РЦ «Нанотехнологии» и лично В. Д. Калганову.

## Литература

1. Бокштейн Б. С., Ярославцев А. Б. Диффузия атомов и ионов в твёрдых телах. М.: МИСИС, 2005. 362 с.
2. Трофимов С. Я., Горшкова Е. И., Салпагарова И. А. Ионный обмен и адсорбция в почвах. М.: Изд-во КДУ, 2008. 98 с.
3. Колышкин А. С. Кинетика ионного обмена на неорганических ионитах: автореф. дис. ... канд. хим. наук. Пермь: Пермский государственный университет, 2005. 19 с.
4. Clearfield A. Inorganic ion exchangers, past, present and future // Solvent extraction and ion exchange. 2000. Vol. 18, iss. 4. P. 655–678.
5. Беллинская Ф. А. Иониты и ионообменные процессы в природе, науке, технике // Ионный обмен и ионометрия. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2000. Вып. 10. С. 7–49.
6. Шелковникова Л. А., Гавлина О. Т., Каргов С. И., Иванов В. А., Альтишуллер Г. Н. Поиск ионообменников для извлечения цезия и рубидия. Возвращение к истокам // Сб. матер. XIII Междунар. конф. «Физико-химические основы ионообменных и хроматографических процессов (Иониты-2011)». Воронеж: Изд-во ВГУ, 2011. С. 185.
7. Ruey-Shin Juang, Shiow-Wen Wang, Li-Chun Lin. Simultaneous recovery of EDTA and lead(II) from their chelated solutions using a cation exchange membrane // J. Membrane Sci. 1999. Vol. 160. P. 225–233.
8. Gopal V., April G. C., Schrodt V. N. Selective lead ion recovery from multiple cation waste streams using the membrane-electrode process // Separation and Purification Techn. 1998. Vol. 14. P. 85–93.
9. Hayashitha T., Bartsch R. A., Kurosawa T., Igawa M. Selective concentration of lead(II) chloride complex with liquid anion-exchange membranes // Anal Chem. 1991. Vol. 63. P. 1023–1027.
10. Иониты в химической технологии / под ред. Б. П. Никольского, П. Г. Романкова. Л.: Химия, 1982. 416 с.
11. Колодезева Н. С., Григорова Н. С., Иванова-Павлова О. С., Карманова Л. А., Синякова М. А. Ионообменные свойства композиционных мембран // Экологич. химия. 2010. Т. 19, вып. 1. С. 49–57.
12. Колодезева Н. С., Григорова Н. С., Иванова-Павлова О. С., Карманова Л. А., Синякова М. А. Электрохимические свойства композиционных мембран на основе неорганических ионитов и фторопласта // Сорбционные и хроматографические процессы. 2010. Т. 10, вып. 4. С. 543–555.
13. Крешков А. П. Основы аналитической химии. М.: Химия, 1970. Т. 2. 472 с.
14. Аширов А. Ионообменная очистка сточных вод, растворов и газов. Л.: Химия, 1983. 259 с.
15. Знаменский Ю. П., Бычков Н. В. Кинетика ионообменных процессов. Обнинск: Изд-во «Принтер», 2000. 204 с.
16. Жадовский И. Т. Термодинамика и кинетика ионного обмена цветных металлов на поверхности железомарганцевых конкреций: дис. ... канд. хим. наук. СПб.: СПбГТИ (ТУ), 2010. 131 с.
17. Минзарь М. А., Синякова М. А. Кинетика обмена ионов таллия(I) и цезия на препарате «ферроцин» и композиционном материале на его основе // Экологич. химия. 2014. № 4. С. 249–252.
18. Строева Э. В., Стряпков А. В., Кукеев М. А. Исследование кинетики сорбции иода из водных растворов методом прерывания // Вестн. Одесского ун-та. 2004. № 4. С. 108–110.

## References

1. Bokstein B. S., Yaroslavl'tsev A. B. *Diffuziia atomov i ionov v tverdykh telakh* [Diffusion of atoms and ions in solids]. Moscow, MISIS Publ., 2005. 362 p. (In Russian)
2. Trofimov S. Ya., Gorshkova E. I., Salpagarova I. A. *Ionnyi obmen i adsorbtsiia v pochvakh* [Ion exchange and adsorption in soils]. Moscow, KDU Publ., 2008. 98 p. (In Russian)
3. Kolishkin A. S. *Kinetika ionnogo obmena na neorganicheskikh ionitakh* [The kinetics of ion exchange for inorganic ion exchangers. Abstr. of PhD chem. sci. thesis]. Perm, Perm State University Publ., 2005. 19 p. (In Russian)



4. Clearfield A. Inorganic ion exchangers, past, present and future. *Solvent extraction and ion exchange*, 2000, vol. 18, iss. 4, pp. 655–678.
5. Belinskaya F. A. Ionity i ionoobmennye protsessy v prirode, nauke, tekhnike [Ion exchanger and ion exchanging processes in nature, science, technology]. *Ionnyi obmen i ionometriia* [Ion exchange and ionometry], St. Petersburg, SPbGU Publ., 2000, iss. 10, pp. 7–49. (In Russian)
6. Shelkovnikova L. A., Gavlina O. T., Kargov S. I., Ivanov V. A., Altshuler G. N. Poisk ionoobmennikov dlia izvlecheniia tseziia i rubidiia. Vozvrashchenie k istokam [The search of ion exchangers for cesium and rubidium extraction. The appeal to origins]. *Sb. mater. XIII Mezhdunar. konf. "Fiziko-khimicheskie osnovy ionoobmennyykh i khromatograficheskikh protsessov (Ionity-2011)"* [Proc. XIII conference "Physical and chemical bases and ion-exchange chromatography processes"]. Voronezh, VGU Publ., 2011, pp. 185. (In Russian)
7. Ruey-Shin Juang, Shiow-Wen Wang, Li-Chun Lin. Simultaneous recovery of EDTA and lead(II) from their chelated solutions using a cation exchange membrane. *J. Membrane Sci.*, 1999, vol. 160, pp. 225–233.
8. Gopal V., April G. C., Schrodt V. N. Selective lead ion recovery from multiple cation waste streams using the membrane-electrode process. *Separation and Purification Techn.*, 1998, vol. 14, pp. 85–93.
9. Hayashita T., Bartsch R. A., Kurosawa T., Igawa M. Selective concentration of lead(II) chloride complex with liquid anion-exchange membranes. *Anal. Chem.*, 1991, vol. 63, pp. 1023–1027.
10. *Ionity v khimicheskoi tekhnologii* [Ion exchangers in chemical technology]. Eds B. P. Nikol'skiy, P. G. Romankov. Leningrad, Khimiia Publ., 1982. 416 p. (In Russian)
11. Kolodezeva N. S., Grigorova N. S., Ivanova-Pavlova O. S., Karmanova L. A., Siniakova M. A. Ionoobmennye svoystva kompozitsionnykh membran [Ion-exchange properties of composite membranes]. *Ekologich. khimiia* [Ecological chemistry], 2010, vol. 19, iss. 1, pp. 49–57. (In Russian)
12. Kolodezeva N. S., Grigorova N. S., Ivanova-Pavlova O. S., Karmanova L. A., Siniakova M. A. Elektrokhimicheskie svoystva kompozitsionnykh membran na osnove neorganicheskikh ionitov i ftoroplasta [The electrochemical properties of composite membranes based on inorganic ion exchangers and fluoroplast]. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy* [Sorption and chromatographic processes]. 2010, vol. 10, iss. 4, pp. 543–555. (In Russian)
13. Kreskov A. P. *Osnovy analiticheskoi khimii* [Fundamentals of analytical chemistry]. Moscow, Khimiia Publ., 1970, vol. 2. 472 p. (In Russian)
14. Ashirov A. *Ionoobmennaiia ochistka stochnykh vod, rastvorov i gazov* [Ion exchange purification of waste water, solutions and gases]. Leningrad, Khimiia Publ., 1983. 259 p. (In Russian)
15. Znamenskii Yu. P., Bichkov N. V. *Kinetika ionoobmennyykh protsessov* [The kinetics of ion exchange processes]. Obninsk, Printer Publ., 2000. 204 p. (In Russian)
16. Zhadovskii I. T. *Termodinamika i kinetika ionnogo obmena tsvetnykh metallov na poverkhnosti zhelezomargantsevykh konkretykh* [Thermodynamics and kinetics of ion exchange non-ferrous metals on the surface of iron-manganese nodules. PhD chem. sci. thesis]. St. Petersburg, St. Petersburg State Technological Institute (Technical University), 2010, 131 p. (In Russian)
17. Minzar M. A., Siniakova M. A. Kinetika obmena ionov talliia(I) i tseziia na preparate "ferrotsin" i kompozitsionnom materiale na ego osnove [The kinetics of exchange of thallium(I) ions and cesium to "ferrocine" preparation and composite materials based on it]. *Ekologich. khimiia* [Ecological chemistry], 2014, no 4, pp. 249–252. (In Russian)
18. Stroeve E. V., Stryapkov A. V., Kiepaev M. A. Issledovanie kinetiki sorbtsii ioda iz vodnykh rastvorov metodom preryvaniia [Study of ion sorption kinetics interrupt method]. *Vestn. Odesskogo un-ta* [Vestnik Odessa State University], 2004, no 4, pp. 108–110. (In Russian)

Статья поступила в редакцию 5 апреля 2016 г.

#### Контактная информация

Антуганова Юлия Олеговна — студентка; e-mail: julia782@list.ru

Синякова Мария Александровна — кандидат химических наук, доцент; e-mail: kafischem@yandex.ru

Antuganova Yulia Olegovna — student; e-mail: julia782@list.ru

Siniakova Maria Alexandrovna — PhD, Associate Professor; e-mail: kafischem@yandex.ru